

Ю.М. ВАСЬКОВСЬКИЙ, О.А. ГЕРАСКІН

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ І ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ В РОТОРІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ПРИ УШКОДЖЕННІ КОРОТКОЗАМКНЕНОЇ ОБМОТКИ РОТОРА

Методами математичного моделювання досліджено температурне поле і термомеханічні напруження в роторі асинхронного двигуна при ушкодженні короткозамкненої обмотки ротора. Показано, що при таких характерних ушкодженнях обмотки ротора як розриви стержнів ротора або сегментів короткозамикаючих кілець, виникає нерівномірний розподіл струмів і нагрів елементів обмотки, що призводить до появи в ній несиметричних термомеханічних напружень. Причина виникнення зазначених напружень полягає в різних величинах лінійного подовження окремих стержнів ротора внаслідок різного їх нагріву. Це прискорює подальшу руйнацію ушкодженої обмотки ротора і може призводити до швидкого виходу асинхронного двигуна з ладу.

Ключові слова: асинхронний двигун, короткозамкнена обмотка ротора, ушкодження обмотки, температура стержнів ротора, термомеханічні напруження.

Методами математического моделирования исследовано температурное поле и термомеханические напряжения в роторе асинхронного двигателя при повреждении короткозамкнутой обмотки ротора. Показано, что при таких характерных повреждениях обмотки ротора как разрывы стержней ротора или сегментов короткозамыкающих колец, возникает неравномерное распределение токов и нагрев элементов обмотки, что приводит к появлению в ней несимметричных термомеханических напряжений. Причина возникновения указанных напряжений заключается в разных величинах линейного удлинения отдельных стержней ротора вследствие различного их нагрева. Это ускоряет дальнейшее разрушение поврежденной обмотки ротора и может приводить к быстрому выходу асинхронного двигателя из строя.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, короткозамкнутая обмотка ротора, повреждение обмотки, температура стержней ротора, термомеханические напряжения.

Purpose. Uneven distributions of currents, heating and thermomechanical stresses in the construction elements of the short-circuit winding of the induction motor rotor are investigated at the characteristic damages of the winding - the breaks of the rods and short-circuiting rings of the rotor. **Methodology.** The article presents two mathematical models. Two-dimensional field mathematical model of the electromagnetic field of the induction motor with damaged rotor rods, which allows with sufficient accuracy to calculate the distribution of currents in the damaged rotor short-circuit coil in a steady state of operation. Two-dimensional field mathematical model of the electromagnetic field of an induction motor with damaged segments of short-circuiting rings. **Results.** With characteristic damage to the short-circuited winding of a rotor, powerful induction motors that appear due to prolonged operation and difficult operating conditions, there are factors that contribute to further accelerated rotor's destruction. **Originality.** Such factors are an increase in total heating and the appearance of an asymmetric temperature distribution between the individual rotor rods, causing the rotation of the rotor asymmetrical thermomechanical stresses to appear in the rotor windings. **Practical value.** The reason for these stresses is the different values of the linear extension of individual rotor rods due to their different heating. This accelerates the further destruction of the damaged winding of the rotor and can lead to quick induction motor failure. Researched results can be used in the induction motors design.

Keywords: induction motor, short-circuited rotor winding, damage of the winding, temperature of rotor bars, thermomechanical stresses.

Вступ. Одним з основних вузлів конструкцій короткозамкнутих асинхронних двигунів (АД) є короткозамкнена обмотка ротора (КЗОР). В процесі тривалої експлуатації, особливо потужних АД, виникають ушкодження елементів КЗОР – тріщини і розриви стержнів ротора (СР) та торцевих короткозамикаючих кілець (КЗК). Такі ушкодження при значних їх обсягах можуть призводити до аварійної зупинки АД з суттєвими економічними збитками. Тому дослідження причин і механізмів руйнації КЗОР з метою попередження аварійних ситуацій має важливе науково-практичне значення. Причини первинного ушкодження КЗОР зазвичай пов'язані з недоліками технологічного процесу виготовлення конкретного АД або з дефектами матеріалів. В елементах неушкодженої КЗОР розподіл індуктованих струмів має симетричний характер, тобто діючі значення струмів в усіх СР і в усіх КЗК є однаковими, що обумовлює симетричний нагрів усіх елементів. При ушкодженні КЗОР симетричний розподіл струмів і температури порушується, що призводить до появи несиметричних термомеханічних напружень (НТМН), які викликають подальшу швидку руйнацію КЗОР. Механізм виникнення НТМН в ушкодженій КЗОР пояснюється різним лінійним розширенням окремих СР внаслідок несиметричного нагріву КЗОР. Особливо це проявляється в потужних АД, які мають достат-

ньо велику довжину ротора. Наприклад, при різниці температур СР в 30°C і довжині ротора 0,85 м, різниця довжин мідних СР складає приблизно 0,5 мм, а механічні напруження в зварних з'єднаннях СР з КЗК дорівнюють величині 72–75 МПа, що наближується до межі міцності матеріалу СР. В неробочому стані АД довжини усіх СР є однаковими. З кожним робочим циклом АД НТМН поступово руйнують елементи КЗОР. Небезпечним є не тільки розрив СР, але й розрив сегмента КЗК. У такому випадку може виникнути руйнування КЗК на іншому торці ротора.

Прискорена руйнація ушкодженої КЗОР відбувається також за рахунок її збільшеного нагріву, відбувається також зростання еквівалентного активного опору КЗОР і, як наслідок, збільшенням робочого ковзання АД при умові незмінності навантаження на валу (електромагнітного моменту). При цьому відповідно зростають струми і нагрів обмотки статора.

Мета досліджень. Дослідження нерівномірного розподілу струмів, нагріву та термомеханічних напружень в елементах конструкції КЗОР АД при характерних ушкодженнях обмотки (розриви стержнів та короткозамикаючих кілець ротора).

Математичні моделі. 1. *Модель АД з розірваними СР.* Двовимірна польова математична

модель електромагнітного поля АД з ушкодженими (розірваними) СР наведена в роботах [1, 2] і дозволяє з достатньою точністю розрахувати розподіл струмів в ушкодженій КЗОР в сталому режимі роботи. Рівняння електромагнітного поля відносно комплексної амплітуди єдиної осової складової век-

торного магнітного потенціалу \dot{A}_z в системі координат ротора має наступний вигляд:

$$\Delta \dot{A}_z - j\omega_1 s \mu \gamma \dot{A}_z = -\mu \dot{J}_{\text{стор}z}, \quad (1)$$

де ω_1 – кутова частота обертання магнітного поля статора; s – ковзання ротора; μ – магнітна

проникність; γ – електропровідність; $\dot{J}_{\text{стор}z}$ – густини сторонніх струмів – густини струмів в трьох фазах обмотки статора:

$$\dot{J}_{A\text{стор}} = I_m u_{\Pi} / S_{\Pi},$$

$$\dot{J}_{B\text{стор}} = I_m u_{\Pi} [\cos(-2\pi/3) - j\sin(-2\pi/3)] / S_{\Pi}, \quad (2)$$

$$\dot{J}_{C\text{стор}} = I_m u_{\Pi} [\cos(-4\pi/3) - j\sin(-4\pi/3)] / S_{\Pi},$$

де I_m – амплітуда струму в фазі обмотки статора; u_{Π} – кількість послідовно з'єднаних провідників в пази статора; S_{Π} – площа перерізу паза статора. Рівняння (1) доповнюється однорідними граничними умовами на зовнішній поверхні осердя статора. В моделі електропровідність неушкоджених СР дорівнює електропровідності матеріалу, з якого кого вони виготовлені, а електропровідність розірваних СР дорівнює нулю.

Після визначення об'ємної густини втрати потужності (Вт/м³) $Q = J^2 / \gamma$, вирішується задача розрахунку сталого теплового поля в АД, для чого розв'язується диференціальне рівняння стаціонарної теплопровідності в двовимірній постановці [4]:

$$\lambda \Delta T = -Q, \quad (3)$$

де $T(x,y)$ – невідома функція розподілу температури; λ – коефіцієнт теплопровідності. Граничними умовами для рівняння (3) є граничні умови третього роду:

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} = \alpha(\theta - \theta_c), \quad (4)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі з охолоджуваних поверхонь; θ_c – температура охолоджуючого повітря ($\theta_c = 40^\circ\text{C}$). Ці умови задаються на зовнішній поверхні ротора і статора, які межують з повітряним проміжком АД, на поверхнях аксіальних охолоджуючих каналів, виконаних під пазами ротора, і на поверхні ярма статора.

Збільшення лінійних розмірів (довжин) СР при їх нагріванні по відношенню до довжини найменш нагрітого стержня, розраховується за формулою:

$$\Delta L_k = \alpha_L \cdot L \cdot (T_k - T_{\min}), \quad k = 1, N_2 \quad (5)$$

де N_2 – кількість СР; α_L – коефіцієнт лінійного розширення (для міді $\alpha_L = 16,7 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, для алюмінію $\alpha_L = 23,8 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$); T_k – температура k -го СР; T_{\min} – мінімальна температура (температура най-

менш нагрітого СР), який має довжину L . Якщо ввести відносне збільшення довжини $\varepsilon_k = \Delta L_k / L$, то термомеханічні напруження, які виникають в СР внаслідок його нагріву, можна виразити згідно з законом Гука за формулою:

$$\sigma_k = E \varepsilon_k, \quad (6)$$

де E – модуль Юнга (для міді $E = 123 \cdot 10^9 \text{ Па}$).

Модель чисельно розв'язується методом скінченних елементів в програмі COMSOL Multiphysics.

2. *Модель АД з розірваними сегментами КЗК.* В рамках двовимірної польової математичної моделі розрив сегментів КЗК не може бути змодельований безпосередньо, оскільки КЗК розташовані на торцях ротора за межами площини поперечного перерізу АД. Для моделювання АД з зазначеним ушкодженням застосовується коло-польова модель, в якій використовується електрична схема заміщення КЗОР [3]. Фрагмент схеми зображено на рис. 1. В цій схемі задаються: електричні параметри СР і сегментів КЗК (з огляду на малу частоту струмів ротора задаються лише активні опори) та ЕРС, індуковані в СР. Опір розірваного сегменту (або декількох сегментів) приймається нескінченно великим і далі знаходиться розподіл струмів в КЗОР при наявності відповідного ушкодження (розв'язок відбувається в програмі Multisim). Надалі отриманий розподіл струмів задається як відомі сторонні струми в рівнянні (1) і вирішується польова задача.

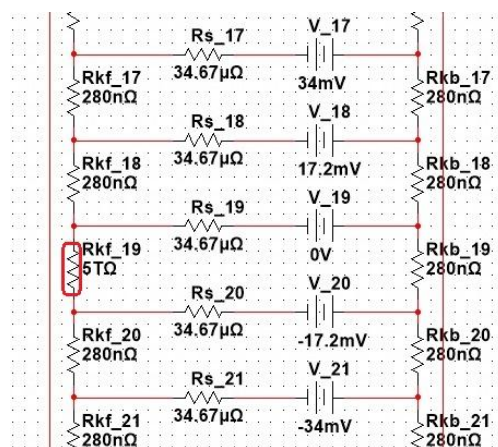


Рис. 1 – Фрагмент електричного кола КЗОР в програмі Multisim

Результати моделювання. Дослідження проводилися на прикладі АД типу АТД, що працює в номінальному режимі і параметри якого такі: номінальна потужність 2500 кВт, коефіцієнт потужності 0,905, ККД 0,964, частота обертання 2980 об/хв, номінальна напруга статора 6 кВ, номінальний струм статора 280 А, діаметр статора 1115 мм, повітряний проміжок 5 мм, кількість пазів статора 48, схема з'єднання фаз обмотки статора – трикутник, діаметр розточки ротора 590 мм, кількість стержнів ротора 38, довжина СР 0,85 м, клас нагрівостійкості ізоляції обмотки статора В, коефіцієнт тепловіддачі з поверхонь статора і ротора в охолоджуюче повітря α

$= 30 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$. Інші теплофізичні дані задавалися згідно з довідковими даними відповідних матеріалів. Під кожним пазом ротора розташовані аксіальні вентиляційні канали.

Дослідження виконувалися для різних варіантів ушкоджень КЗОР, так, наприклад, кількість розірваних і поряд розташованих стержнів або сегментів КЗК варіювалася від 1 до 5.

При ушкодженні КЗОР і збільшенні її активного опору спочатку струми в стержнях ротора зменшуються, що зменшує обертовий електромагнітний момент АД. Але оскільки гальмівний момент залишається незмінним, то починається гальмування ротора і збільшення робочого ковзання, що супроводжується зростанням струмів статора і ротора і відповідним зростанням електромагнітного моменту для урівноваження незмінного гальмівного моменту навантаження.

Урахування збільшення тепловиділення в роторі і статорі АД внаслідок збільшення струмів статора і ротора можна охарактеризувати коефіцієнтом $k_{СКЗ\text{ }I}$, який розраховується як середньоквадратичне значення усіх струмів в СР. Це обумовлено тим, що струми ротора обертаються відносно ротора з частотою ковзання і рівномірно (усереднено, або середньоквадратично) прогрівають ротор уцілому. Наприклад, в таблиці 1 показано величини коефіцієнта збільшення струмів ротора для різної кількості ушкоджених поряд розташованих сегментів КЗК.

Таблиця 1 – Коефіцієнт збільшення струмів ротора при зміні кількості ушкоджених поряд розташованих сегментів КЗК

Параметр	Кількість поряд розташованих ушкоджених сегментів КЗК					
	0	1	2	3	4	5
$k_{СКЗ\text{ }I}$	1,00	1,15	1,18	1,25	1,27	1,31

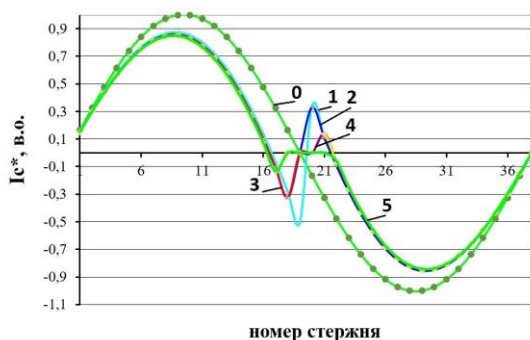


Рис. 2 – Розподіл струмів в СР при ушкодженні сегментів КЗК в залежності від кількості ушкоджених сегментів

На рис. 2 показано розподіл струмів в СР при ушкодженні сегментів КЗК в залежності від кількості ушкоджених СКК: графік 1 – ушкоджено 1 сегмент, який знаходиться на одній стороні ротора між стержнями ротора з номерами 19 і 20 (рис. 1), графік 2 – ушкоджено 2 сегменти між стержнями 19 і 21, графік 5 – ушкоджено 5 сегментів між стержнями 17 і 22. Показаний на рис. 2 розподіл струмів розраховано при умові незмінності ковзання ротора, що

дозволяє оцінити вплив відповідних ушкоджень КЗОР на величину струмів ротора.

На першому етапі було досліджено температурне поле неушкодженого АД. Встановлено, що обмотка статора нагрівається більше за ротор, зокрема максимальна температура статора складає $103,8^{\circ}\text{C}$, а ротор нагрівається до $77,5^{\circ}\text{C}$. Виявлено нерівномірність розподілу температури обмотки статора уздовж висоти паза статора, яка становить приблизно 5°C .

В неушкодженному АД струми в стержнях ротора розподілені синусоїдально і зміщуються з частотою ковзання (3–5 Гц), в результаті чого вся обмотка ротора нагріта рівномірно.

Дослідження температурного поля при ушкодженні стержнів КЗОР АД. За результатами дослідження температурного поля АД при зміні кількості поряд розташованих розірваних стержнів КЗОР було виявлено таке.

На рис. 3 представлено картину розподілу температури в роторі АД при розриві 5-ти поруч розташованих СР. На рис. 4 показано залежності температури по стержнях ротора для різної кількості розірваних СР. З рис. 3, 4 чітко видно нерівномірний розподіл температури уздовж поверхні ротора.

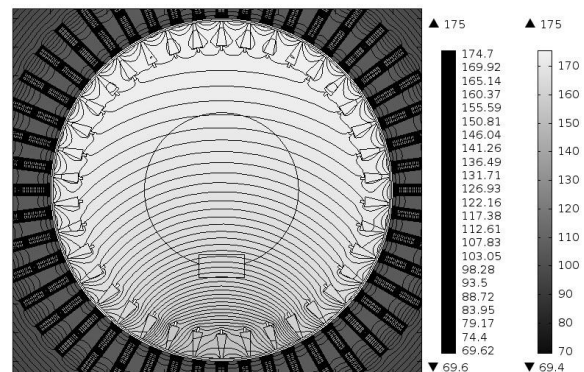


Рис. 3 – Розподіл температури в роторі АД при 5 ушкоджених стержнях КЗОР АД

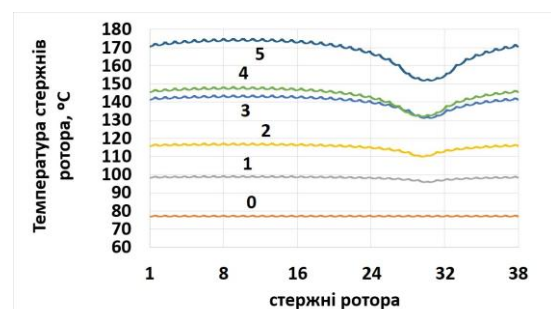


Рис. 4 – Температура в стержнях ротора в залежності від кількості ушкоджених стержнів КЗОР АД

Загальний нагрів ушкодженого ротора у порівнянні з неушкодженим зростає в 1,33–2,27 разів в залежності від обсягів ушкодження, що є важливою причиною подальшого швидкого руйнування КЗОР. При цьому, якщо при розриві одного стержня максимальна різниця температури різних СР складає 6°C , то при ушкодженні 5-ти стержнів ротора АД різниця температури різних стержнів ротора становить 23°C . При

цьому різниця величин довжин окремих СР КЗОР внаслідок їх теплового розширення становить: $\Delta L = 16,7 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \cdot 0,85 \cdot 23 \text{ } ^\circ\text{C} = 0,33 \text{ мм}$.

Дослідження температурного поля при ушкодженні сегментів КЗК АД. За результатами дослідження температурного поля АД при зміні кількості поряд розташованих ушкоджених сегментів КЗК КЗОР було виявлено таке.

При обриві одного сегменту КЗК стержні ротора, що розташовані поруч з цим сегментом, не тільки не виключаються з електричного кола ротора, але й по ним будуть протікати більші струми. Це пояснюється тим, що струми ротора оминають ушкоджений сегмент КЗК, внаслідок чого збільшуються струми в СР, найближчих до ушкодженого сегменту (рис. 2).

При обриві двох і більше поруч розташованих сегментів КЗК виникає інша ситуація: СР, які розташовані між цими сегментами, виключаються з електричного кола ротора і струм по ним не протікає, а по суміжним стержням протікають більші струми.

На рис. 5 представлено картину розподілу температури в роторі АД при розриві 5-ти поруч розташованих сегментів КЗК, а на рис. 6 показано залежності температури по стержнях ротора для різної кількості розірваних сегментів КЗК. З рис. 5, 6 також чітко видно нерівномірний розподіл температури уздовж поверхні ротора.

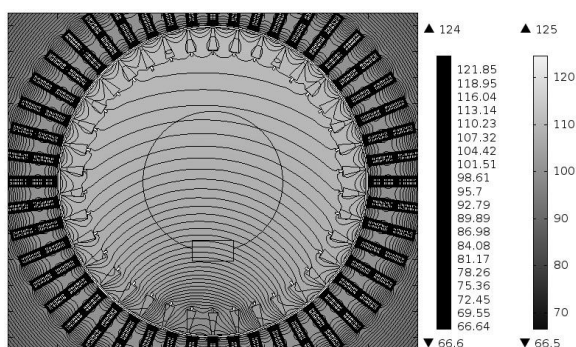


Рис. 5 – Температура в роторі АД при 5-ти ушкоджених сегментах КЗК

Загальний нагрів ротора також суттєво зростає – в 1,24–1,57 разів в залежності від обсягів ушкодження, але є меншим, ніж при розриві СР.

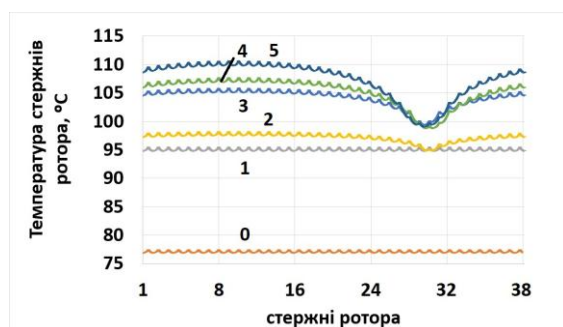


Рис. 6 – Температура в стержнях ротора в залежності від кількості ушкоджених сегментів КЗК

При ушкодженні 5-ти сегментів КЗК різниця між нагрівом різних стержнів ротора становить 12°C.

Різниця величин термомеханічного подовження довжин СР АД становить:

$$\Delta L = 16,7 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \cdot 0,85 \text{ м} \cdot 12 \text{ } ^\circ\text{C} = 0,17 \text{ мм}.$$

Несиметричні термомеханічні напруження при ушкодженні КЗОР АД.

Найбільші НТМН в КЗОР будуть виникати тоді, коли один або декілька СР внаслідок їх розривів або розривів декількох сегментів КЗК не обтікаються струмами ротора. Наприклад, один стержень є вимкненим через ушкодження КЗК, а суміжний стержень є перегрітим. Тоді різниця температурного подовження довжин зазначених СР буде найбільшою. Оцінки, проведені на прикладі потужного АД, показують, що в реальних умовах така різниця може сягати величини 0,4–0,5 мм. При цьому виникаючі НТМН складають 55–65 МПа і діють перш за все на зварні з'єднання між СР і КЗК. Якщо ушкоджуються КЗК на одній стороні ротора, то це може призвести до ушкодження КЗК на іншій стороні ротора.

Висновки.

1. При характерних ушкодженнях короткозамкнутої обмотки ротора потужних АД, які з'являються внаслідок тривалої роботи та важких умов експлуатації (розриви стержнів ротора і сегментів короткозамикаючих кілець), виникають фактори, які сприяють подальшій прискореній руйнації ротора. Такими факторами є збільшення загального нагріву і поява несиметричного розподілу температури між окремими стержнями ротора, що викликає появу в обмотці ротора несиметричних термомеханічних напружень.

2. Більш небезпечним ушкодженням є розриви стержнів ротора: в залежності від обсягів ушкодження температура ротора зростає в 1,33–2,27 разів, а перепад температури між окремими стержнями сягає 30°C. Розрив сегментів КЗК також є небезпечним видом ушкодження, при якому нагрів ротора збільшується в 1,24–1,57 разів в залежності від обсягів ушкодження.

3. Різний нагрів СР призводить до виникнення термомеханічних напружень в КЗОР 55–65 МПа.

Список літератури

1. Васьковський Ю.М., Вплив ушкоджень короткозамкнутого ротора асинхронного двигуна на електромагнітний момент / Ю. М. Васьковський, О. А. Гераскін, // Вісник Кременчуцького нац. ун-ту імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2014. – Вип. 4/2014(87). – С. 20-24.
2. Васьковський Ю.М. Діагностика кутового ексцентриситету ротора асинхронних двигунів на основі аналізу вібробуджуючих сил / Васьковський Ю.М., Гераскін О.А., Беленок Н.В. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2016. – № 11(1183). – С. 30-35.
3. Васьковський Ю. Н. Анализ вибровозмущающих сил в асинхронных двигателях при обрыве сегментов короткозамыкающих колец обмотки ротора на основе цепи-полевой математической модели / Ю. Н. Васьковский, А. А. Гераскин, М. А. Коваленко // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – № 5. – С. 18-22.
4. Филипов И.Ф. Теплообмен в электрических машинах. Добавочные потери в турбогенераторах –Л.: Энергоатомиздат Л.О., 1986. – 256 с.

References (transliterated)

1. Vaskovskiy Yu.M., Vpliv ushkodzen korotko-zamknеного ротора асинхронного двигуна на електромагнітний момент [Influence of damages of short-circuited rotor of induction motor on electromagnetic moment] / Yu. M. Vaskovskiy, O. A. Geraskin, // Visnik Kremenchutskogo nats. un-tu imeni Mihayla Ostrogradskogo. – Kremenchuk: KrNU, 2014. – Vip. 4(2014(87)). – С. 20-24.
2. Vaskovskiy Yu.M. Diagnostika kutovogo ekstse-ntrisitetu ротора асинхронних двигунів на основі аналізу вібробудзхувучих сил [Diagnostics of the angular eccentricity of induction motors rotor on the basis of the analysis of vibro-perturbing forces] / Vaskovskiy Yu.M., Geraskin O.A., Belenok N.V. // Visnik Natsionalnogo tehničnogo universitetu «HPI». Zbirnik naukovih prats. Seriya: Elektrichni mashini ta elektromehanichne peretvorennya energiyi. – Harkiv : NTU «HPI». – 2016. – № 11(1183). – С. 30-35.
3. Vaskovskiy Yu. N. Analiz vibrovozmushchayushchih sil v asinhronnyih dvigatelyah pri obryive segmentov korotkozamyikayushchih kolets obmotki ротора na osnove tsepe-polevoy matematicheskoy modeli [Analysis of vibro-perturbing forces in induction motors in case of breakage of short-circuiting rotors winding rings segments based on a chain-field mathematical model] / Yu. N. Vaskovskiy, A. A. Geraskin, M. A. Kovalenko // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2011. – № 5. – С. 18-22.
4. Filipov I.F. Teploobmen v elektricheskikh mashinah. Dobavochnyie poteri v turbogeneratorah [Heat exchange in electric machines. Additional losses in turbogenerators] –L.: Energoatomizdat L.O., 1986. – 256 s.

Надіслано (received) 08.02.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Дослідження температурного поля і термомеханічних напружень в роторі асинхронного двигуна при uszkodженні короткозамкнутої обмотки ротора / Ю. М. Васьковський, О. А. Гераскін // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 33–37. – Библиогр.: 4 назв. – ISSN 2409-9295.

Исследование температурного поля и термомеханических напряжений в роторе асинхронного двигателя при повреждении короткозамкнутой обмотки ротора / Ю. Н. Васьковский, А. А. Гераскин // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 33–37. – Библиогр.: 4 назв. – ISSN 2409-9295.

Investigation of the temperature field and thermomechanical stresses in induction motor rotor in case of damage of rotor short-circuited winding / Y. N. Vaskovskiy, A. A. Geraskin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 33–37. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / About the Authors

Васьковський Юрій Миколайович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри електромеханіки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; тел.: (050) 10-220-10; e-mail: vun157@gmail.com.

Васьковский Юрий Николаевич – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», профессор кафедры электромеханики; тел.: (050) 10-220-10; e-mail: vun157@gmail.com.

Vaskovskiy Yuriy Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor at the Department of Electromechanics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", tel.: (050) 10-220-10; e-mail: vun157@gmail.com.

Гераскін Олександр Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри електромеханіки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; тел.: (099) 364-75-94; e-mail: nirbikalpasamadhi@ukr.net.

Гераскин Александр Анатольевич – кандидат технических наук, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», доцент кафедры электромеханики; тел.: (099) 364-75-94; e-mail: nirbikalpasamadhi@ukr.net.

Geraskin Alexandr Anatolievich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor at the Department of Electromechanics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", tel.: (099) 364-75-94; e-mail: nirbikalpasamadhi@ukr.net.